



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

금속 폼 유로에서 매니폴드 크기에 따른  
고분자 전해질 연료전지의 성능 분석

PEMFC Performance Analysis  
with Metal Foam Flow Field:  
Manifold Size Effect

울산대학교 대학원

화학공학과

김현우

금속 폼 유로에서 매니폴드 크기에 따른  
고분자 전해질 연료전지의 성능 분석

지도교수 김 준 범

이 논문을 공학석사 학위 논문으로  
제출함

2024 년 08 월

울 산 대 학 교 대 학 원

화 학 공 학 과

김 현 우

김현우의 공학석사 학위 논문을 인준함

심사위원장	강	성	구	(인)
심사위원	김	준	범	(인)
심사위원	오	은	석	(인)

울 산 대 학 교 대 학 원

2024 년 8 월



## 감사의 글

학부 연구생부터 석사 과정까지 연구실 생활을 하며 많은 것을 배우고 성장할 수 있었습니다. 언제나 저희가 하고자 하는 연구를 아낌없이 지원해주신 김준범 교수님께 진심으로 감사드립니다. 그리고 논문 심사를 맡아주신 오은석 교수님, 강성구 교수님께도 감사의 말씀을 드립니다. 첫 연구실 생활부터 지금까지 잘 헤쳐 나가도록 가장 많이 도와주신 준섭이 형, 성훈이형에게 감사드리고, 언제나 따뜻한 조언과 어려운 순간마다 힘이 되어주신 연구실 선배님들께 감사드립니다. 석사 생활 동안 연구실에서 함께한 경민이형, 건우, 승현이, 현동이, 상봉이, 수현이, 건희, 한규와 제 동기들에게 감사한 마음을 전합니다. 그리고 석사과정을 잘 마무리할 수 있도록 굳은 일도 마다하지 않고 도와주었던 지원이에게 정말 고맙다는 말을 전합니다. 연구실에서의 생활이 여러분들 덕분에 즐겁고 의미 있었습니다.

마지막으로 저의 모든 결정을 항상 지지하고 응원하며 힘이 되어 주시는 아버지, 어머니, 동생에게 감사의 말씀을 전합니다.

2024년 06월 석사 과정을 마치며,

김 현 우

## 국문 요약

최근 화석 연료에 의존하는 기존 발전 시스템을 청정하고 재생 가능한 에너지 발전 시스템으로 전환하는 것은 인류의 지속 가능성을 보장하기 위해 각광받고 있다. 고분자 전해질 연료전지(PEMFC)는 고효율, 저공해 특성으로 인해 차세대 에너지원으로 주목받고 있는 친환경적인 에너지 변환 장치이다. 고분자 전해질 연료전지의 성능은 반응물의 물질 전달에 의존하며, 이는 분리판의 유로에 큰 영향을 받는다. 기존의 채널/립 형태의 유로에 비교하여, 다공성 유로는 립 영역에서의 불균일한 압력 및 수분 응축을 방지하고, 전극 면적에 반응물을 균일하게 공급하며, 생성수를 효과적으로 배출할 수 있는 장점을 제공한다. 이에 따라 최근 다공성 유로에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 연구에서는 금속 폼 유로에서 매니폴드 크기가 연료전지 성능에 미치는 영향에 관한 실험을 수행하였고, 실험 과정에서 상대습도와 공기의 화학양론비를 조절하였다. 고습도 조건에서 매니폴드의 크기가 작아지면 물질 전달 손실이 감소하였으나, 매니폴드 크기가 가장 작은 샘플의 경우 생성수 배출의 한계로 인해 물질 전달 손실이 오히려 증가하였다. 저습도 조건에서는 물질 전달 손실의 영향이 적어 매니폴드 크기에 따른 성능 차이가 크지 않았다. 공기의 화학양론비를 증가시켰을 때, 상대습도에 관계없이 매니폴드 크기가 가장 작은 샘플의 성능이 가장 크게 향상되었지만, 저습도 조건에서는 상대적으로 성능 개선 효과가 미미하였다. 따라서 매니폴드 크기는 주로 물질 전달 손실과 관련이 있고, 매니폴드 크기의 최적화는 고전류밀도에서의 수소 연료 효율을 향상시킬 수 있는 것으로 확인되었다.

## Abstract

In recent years, the transformation of conventional power generation systems that rely on fossil fuels to clean and renewable energy generation systems has gained prominence to ensure human sustainability. Polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) is an environmentally friendly energy conversion device that is attracting attention as a next-generation energy source due to its high efficiency and low emission characteristics. The performance of PEMFC relies on the mass transfer of reactants, which is strongly influenced by the flow field of the bipolar plates. Compared to conventional channel/rib flow fields, porous flow fields have the advantages of preventing uneven pressure and water condensation in the rib area, uniformly supplying reactants to the electrode area, and effectively discharging water. As a result, porous flow fields have been extensively studied in recent years.

In this study, the effect of manifold size on fuel cell performance in a metal foam flow field was investigated. The experiments controlled the relative humidity and air stoichiometry. Under high relative humidity conditions, mass transfer losses decreased with smaller manifold sizes. However, for the sample with the smallest manifold size, mass transfer losses increased due to limitations in water discharge. In low relative humidity conditions, mass transfer losses were less affected, resulting in insignificant performance differences based on manifold size. Increasing the air stoichiometry improved the performance of the sample with the smallest manifold size the most, regardless of relative humidity. However, the performance enhancement was relatively minor under low humidity conditions. Thus, the study confirmed that manifold size primarily affects mass transfer loss, and optimizing the manifold size can enhance hydrogen fuel efficiency at high current densities.

# 목 차

감사의 글

국문요약

Abstract

목차

그림 목차

표 목차

<b>1. 서론</b> .....	<b>1</b>
1.1. 연구 배경 .....	1
1.2. 선행 연구 .....	4
1.3. 연구 목적 .....	6
<b>2. 실험</b> .....	<b>7</b>
2.1. 금속 폼 압축 및 특성 분석 .....	7
2.2. 단위전지 제작 .....	10
2.3. 전기화학적 분석 .....	13
<b>3. 실험결과</b> .....	<b>15</b>
3.1. 고습도 조건에서의 매니폴드 크기 영향 .....	15
3.2. 저습도 조건에서의 매니폴드 크기 영향 .....	21
3.3. 화학양론비에 대한 매니폴드 크기 영향 .....	27
3.3.1. 고습도 조건 .....	27
3.3.2. 저습도 조건 .....	32
<b>4. 결론</b> .....	<b>35</b>
<b>5. 참고문헌</b> .....	<b>37</b>

## 그림 목 차

Figure 1. Schematic diagram of PEMFC

Figure 2. Schematic diagram for copper foam compression method.

Figure 3. SEM images of compressed copper foam. (a) In-plane (b) Through-plane.

Figure 4. Photographs of bipolar plates with different manifold sizes. (a) S1 (3 mm x 9 mm)  
(b) S2 (3 mm x 3 mm) (c) S3 (1 mm x 1 mm).

Figure 5. Photographs of different flow field types. (a) Serpentine flow field  
(b) Metal foam flow field.

Figure 6. IR-corrected polarization curves with different manifold sizes at 100% relative humidity condition.

Figure 7. Nyquist plots with different manifold sizes at 100% relative humidity condition.  
(a) 0.2 A/cm<sup>2</sup> (b) 1.2 A/cm<sup>2</sup>

Figure 8. Differences in pressure drop at 1660 sccm, ohmic, charge transfer and mass transfer resistance at 1.2 A/cm<sup>2</sup>.

Figure 9. Charge transfer and mass transfer resistance with different manifold sizes at 100% relative humidity condition.

Figure 10. Polarization curves with different manifold sizes at 25% relative humidity condition.

Figure 11. Nyquist plots with different manifold sizes at 25% relative humidity condition.  
(a) 0.4 A/cm<sup>2</sup> (b) 1.2 A/cm<sup>2</sup>

Figure 12. Ohmic resistance with different manifold sizes.

Figure 13. Charge transfer and mass transfer resistance with different manifold sizes at 25% relative humidity condition.

Figure 14. Polarization curves with different manifold sizes, air stoichiometry at 100% relative humidity condition. (a) S1 (b) S2 (c) S3 (d) Serpentine.

Figure 15. Pressure drop with different manifold sizes.

Figure 16. Polarization curves with different manifold sizes, air stoichiometry at 100% relative humidity condition. (a) Air stoichiometry 2.0 (b) 3.0 (c) 4.0

Figure 17. Polarization curves with different manifold sizes, air stoichiometry at 25% relative humidity condition. (a) S1 (b) S2 (c) S3 (d) Serpentine.

## 표 목 차

Table 1. Physical properties of copper foam.

Table 2. Specification of PEMFC and experimental conditions.

Table 3. Cell performance with air stoichiometry and manifold size at 100% relative humidity condition.

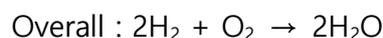
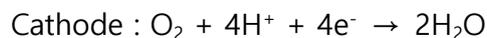
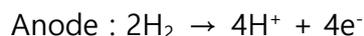
Table 4. Cell performance with air stoichiometry and manifold size at 25% relative humidity condition.

## 1. 서론

### 1.1. 연구 배경

탄소중립을 달성하기 위해서는 화석연료 중심의 에너지에서 저탄소 및 무탄소 에너지로의 전환이 필수적이다. 수소 에너지는 친환경적이며 장기적으로 에너지를 저장하고 다양하게 활용할 수 있어, 지속 가능한 발전을 향한 글로벌 에너지 전환에 기여할 수 있다 [1,2]. 고분자 전해질 연료전지(polymer electrolyte membrane fuel cell, PEMFC)는 수소와 산소의 전기화학반응을 통해 연료의 화학 에너지를 전기 에너지로 직접 변환하는 수소 에너지의 대표적인 응용 분야로 높은 에너지 밀도, 고효율, 저공해의 특성을 가지고 있어 수송 및 발전용으로 널리 활용되고 있다[3-5].

PEMFC는 수소 이온 교환 특성을 갖는 고분자를 전해질 막으로 사용하는 연료전지이다. 단위 셀의 구성 요소는 Figure 1에서와 같이 전해질 막(membrane), 촉매층(catalyst layer, CL), 기체확산층(gas diffusion layer, GDL), 가스켓(gasket), 분리판(bipolar plate, BPP) 등으로 구성되어 있다[6]. PEMFC를 자동차의 동력원이나 발전용의 전력원으로 사용하기 위해서는 높은 전력을 요구하는데, 이는 다수의 단위 셀을 직렬로 연결하여 스택 형태로 이용한다. PEMFC의 주요 반응은 Anode에서의 수소 산화 반응, Cathode에서의 산소 환원 반응이 있다. Anode에서는 수소 분자가 수소 양이온과 전자로 분리되는 수소 산화 반응이 일어난다. 이 중 수소 양이온은 전해질 막을 통해, 전자는 외부 도선을 통해 Cathode로 이동한다. 따라서 Cathode에서는 산소 분자와 Anode로부터 이동한 수소 양이온 및 전자가 반응하여 물이 생성되는 산소 환원 반응이 일어난다[7-9].



BPP는 연료전지의 주요 구성 요소 중 하나로 스택 무게의 약 60-80%, 가격의 약 20-30%를 차지한다[10]. BPP는 수소와 산소를 전극에 균일하게 분배하고, 각 단위 셀 간 전기적으로 연결하는 역할을 한다. 또한 막전극접합체(membrane electrode assembly, MEA)의 기계적 지지를 하며, 물과 열을 배출 및 전도하는데 도움을 준다. 따라서 BPP는 우수한 전기 및 열 전도성, 우수한 기계적 특성, 낮은 가스 투과도, 소수성 등을 필요로 한다[11-13]. 기존 분리판 유로는 사형, 수평형, 교차형 등이 있으며, 이러한 유로들은 채널과 립 구조를 갖추고 있다. 이는 립에서의 기체확산층과 전극에서 불균일한 반응물 기체와 물의 분포로 인해 연료전지의 성능이 저하될 수 있다[14,15]. 따라서 반응물과 물의 분포를 균일하게 유지하기 위해 립의 부정적인 영향을 최소화하거나 제거하는 유로 설계가 중요하다.

최근 3차원 다공성 구조의 유로에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 다공성 유로는 3차원 기공 구조를 가지므로 기존의 채널/립 구조를 가지는 유로에 비해 전극에 균일한 반응물의 공급이 가능하며, 질량 밀도가 낮기 때문에 스택의 무게를 감소시킬 수 있다. 다공성 물질 중 금속 폼은 기계적 강도가 우수하고 열 및 전기 전도성이 높으며, 비교적 물성 제어가 쉽고, 다양한 금속으로 가공이 가능하여 PEMFC의 분리판 소재로 주목받고 있다[16-18].

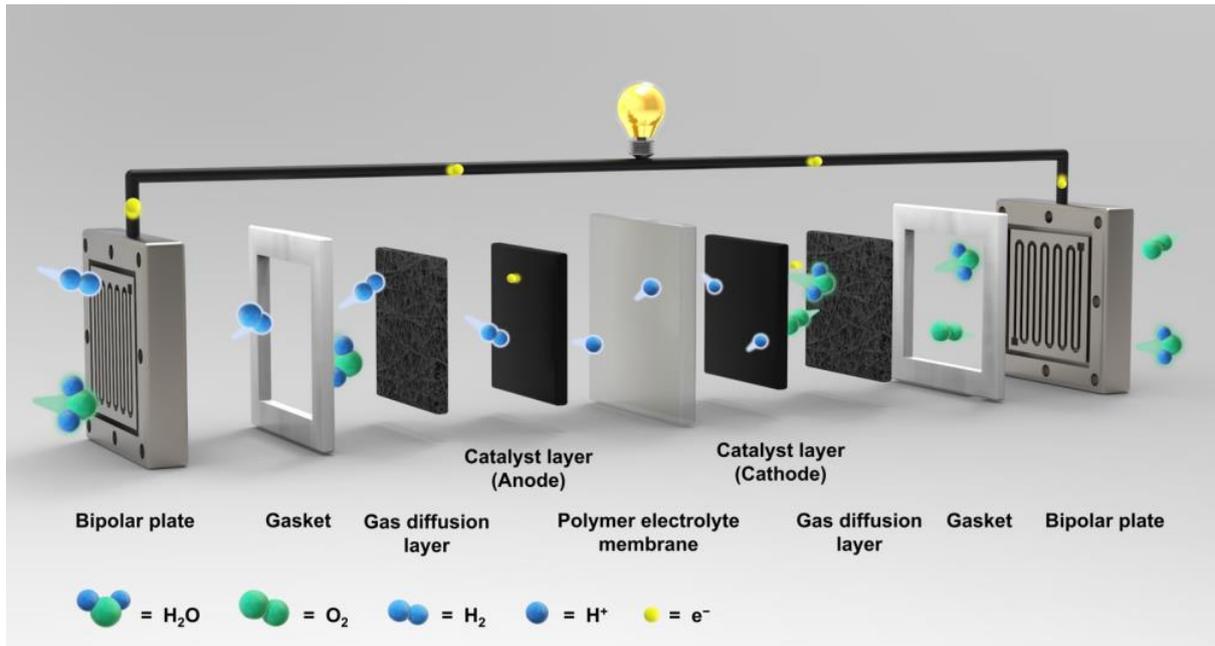


Figure 1. Schematic diagram of PEMFC [6]

## 1.2. 선행 연구

채널/립 구조를 가지는 기존 유로의 단점을 극복하기 위해, 금속 폼 유로가 PEMFC에 미치는 영향을 분석한 연구가 활발하게 이루어졌다.

Carton, Olabi[19]는 전산 해석을 통해 금속 폼 유로에서 기존 유로에 비해 균일한 산소 및 수분 분포를 보였으며, 이는 물질 전달 손실이 감소하여 더 높은 성능을 나타내는 것을 확인하였다. Azarafza 등[20]은 전산 유체 역학으로 금속 폼 유로를 평행, 사형, 교차형, 블록이 있는 평행 유로와 비교하였다. 금속 폼 유로는 다른 유로에 비해 최대 전력 밀도가 10-50% 높았으며, 이는 낮은 수분 포화, 균일한 반응물 및 온도 분포로 인한 것으로 나타났다. Shin 등[21]은 실험적으로 사형 유로와 금속 폼 유로를 비교하였다. 기공 크기가 다른 4가지 종류의 금속 폼을 사용하였고, 금속 폼과 기체확산층의 접촉 면적을 대략적으로 계산하여 연료전지 간 성능 차이를 설명하였다. 그리고 혼합 금속 폼 유로를 적용하여 기존 사형 유로에 비해 최대 전력 밀도를 약 60% 향상시켰다. Suo 등[22]은 전산 해석으로 양극의 산소 전달을 기존 유로와 금속 폼 유로를 비교하였다. 금속 폼 유로는 촉매 층으로의 산소 전달 및 산소 분포의 균일성을 향상시켰다. 또한, 금속 폼의 기공 밀도와 압축비가 증가하면 산소의 전달이 향상되었으며, 이는 특히 높은 유입 속도에서 더욱 두드러졌다. Park 등[23]은 실험을 통해 금속 폼 유로의 두께, 면적 밀도 및 기공 크기를 최적화하였고, 이는 사형 유로에 비해 전력 밀도를 178% 향상시켰다. Kang 등[24]은 입구에서 출구까지 대각선 방향으로 공극률 구배를 갖는 금속 폼 유로를 설계하여 생성수 배출과 농도 손실을 개선하였으며, 기존 금속 폼 유로에 최대 전력 밀도를 약 8% 향상시켰다. Wu 등[25]은 중성자 영상법으로 금속 폼 유로와 사형 유로의 수분 함량 변화를 연구하였으며, 금속 폼 유로가 수분 분포의 균일성을 개선하고 탈수에 대한 내성을 향상시키는 것을 확인하였다. Liu 등[26]은 금속 폼 유로에서 기체 확산 및 촉매 활성의

균일성이 향상될 수 있고, 금속 폼의 압축률이 증가할수록 PEMFC의 성능이 증가하는 것을 확인하였다.

금속을 분리판 소재로 사용하는 경우, 고분자 전해질 연료전지의 산성 운전 조건에서 부식 및 금속 이온 용출 현상이 발생하는 문제점이 존재한다[27,28]. 이러한 문제를 해결하기 위해, 금속 폼의 내식성 및 전도성을 향상시키기 위한 귀금속, 금속 질화물, 탄소계 물질 등의 표면처리에 관한 연구가 진행되고 있다[29-32]. 그러나 금속 폼은 표면의 불규칙한 성질과 다공성 구조로 인해 일반 금속 분리판에 비해 넓은 표면적을 가지며, 이로 인해 표면처리에 어려움이 있다[33].

### 1.3. 연구 목적

금속 폼의 재료 및 구조에 관한 다수의 선행 연구가 수행되었다. 소재, 기공 크기, 기공률, 두께 및 면적밀도는 PEMFC 내에서 반응물 분포, 물 관리 및 금속 폼의 전기 전도도에 중요한 구조적 특성으로 보고되었다[16]. 하지만 금속 폼 유로와 매니폴드에 관한 연구는 아직 수행되지 않았다.

PEMFC의 성능과 내구성은 여러 구성 요소에 의해 좌우되며, 앞서 언급한 분리판의 유로 형상과 더불어 매니폴드의 형상 또한 중요한 역할을 한다. 매니폴드 설계의 중요성은 연료전지 스택의 균일한 반응물 분포와 물 관리에 크게 기여함으로써, 연료전지의 성능 및 장기적인 내구성 향상에 필수적이다. 매니폴드 크기와 형상을 최적화함으로써 흐름 저항을 최소화하고, 반응물의 균일한 분포를 보장할 수 있다. 이는 연료전지의 전기적 효율뿐만 아니라 열적 관리에도 긍정적인 영향을 미친다. 따라서 본 연구에서는 반응 기체의 상대습도와 화학양론비 조건에 따라 금속 폼 유로에서 매니폴드 크기가 PEMFC 성능에 미치는 영향을 분석하기 위해 연료전지 입구와 출구 사이의 압력 강하를 측정하고 전기화학분석을 수행하였다.

## 2. 실험

### 2.1. 금속 폼 압축 및 특성 분석

본 연구에서 사용된 금속 폼은 cell 크기가 450  $\mu\text{m}$ , 두께가 800  $\mu\text{m}$  인 구리 폼(E&KOA, Korea)을 사용하였으며, 구리 폼은 제작한 분리판의 깊이와 일치하도록 500  $\mu\text{m}$  두께로 압축하였다. 압축 과정은 Figure 2 에 나타난 바와 같이 프레스 머신을 사용하여 상온에서 5 MPa 의 압력으로 1 분간 진행되었다.

압축된 구리 폼의 물리적 특성을 분석하기 위해 수은 압입법(Mercury Intrusion Porosimetry, MIP)과 주사 전자 현미경(Scanning Electron Microscope, SEM) 측정을 수행하였다. 수은 압입법은 시료에 존재하는 기공 구조의 특성을 상세히 분석할 수 있는 대표적인 기법으로, 금속 폼의 내부 구조에 관한 정보를 제공한다. AutoPore V 9600(Micromeritics, USA) 장비를 사용하여 수은 압입법을 진행하였고, 해당 분석법으로 압축된 구리 폼의 공극률, 기공 크기 및 기공 체적을 측정하였다. 또한, 주사 전자 현미경은 고해상도 이미지를 제공하여 금속 폼의 표면 및 내부 구조를 시각적 정보를 제공한다. 따라서 해당 분석 방법을 활용하여 구리 폼의 미세 구조와 표면 특성을 분석하였다. 이를 위해 AIS200C(Seron Tech, Korea) 장비를 사용하였으며, 분석 결과는 Figure 3, Table 1 에 제시하였다.

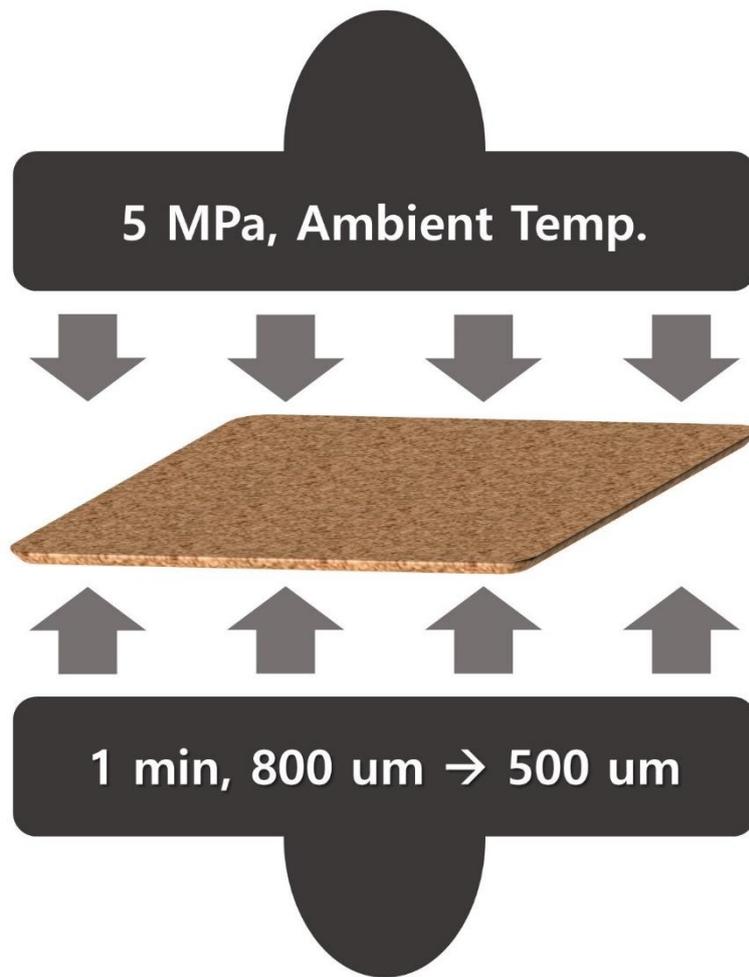


Figure 2. Schematic diagram for copper foam compression method.

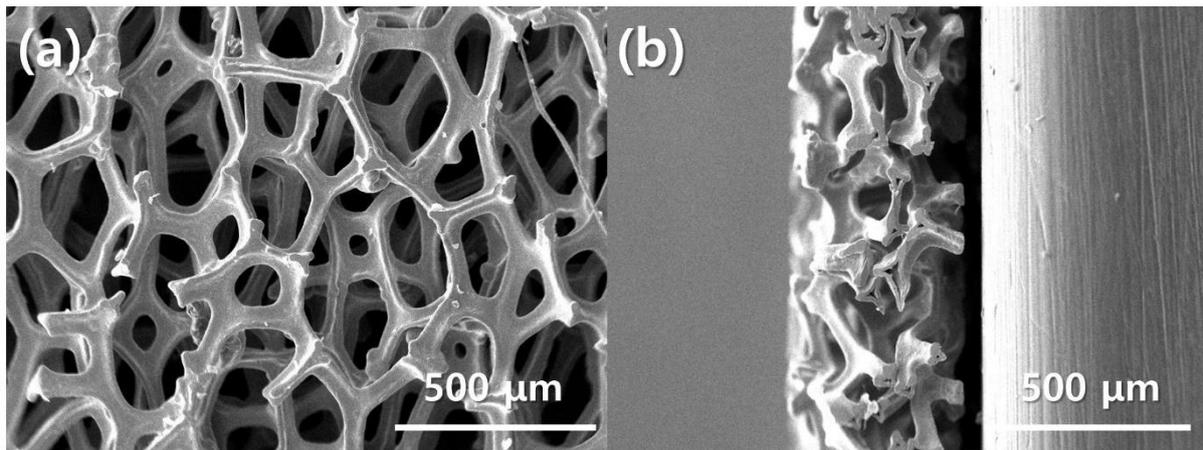


Figure 3. SEM images of compressed copper foam. (a) In-plane (b) Through-plane.

Table 1. Physical properties of copper foam.

Material	Pure Cu
Cell size (um)	450
Thickness (um)	800
Compress ratio (%)	37.50
Porosity (%)	78.12
Pore size (um)	74.66
Pore volume (mL/g)	0.63

## 2.2. 단위전지 제작

금속 폼 유로에서 매니폴드 크기가 PEMFC 성능에 미치는 영향을 분석하기 위해 반응 면적  $25 \text{ cm}^2$ , 깊이  $0.5 \text{ mm}$ 인 무유로 분리판을 설계 및 제작하였다. 제작한 분리판은 매니폴드 크기에 따라 세 가지 유형으로 구분하였으며, 각각 S1( $3 \text{ mm} \times 9 \text{ mm}$ ), S2( $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ ), S3( $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ )로, Figure 4에 나타내었다. 또한, 금속 폼 유로와 기존 사형 유로 간의 성능 차이를 분석하기 위해 채널 폭  $1.0 \text{ mm}$ , 깊이  $0.6 \text{ mm}$ (음극)/ $0.9 \text{ mm}$ (양극)인 5채널 사형 유로를 사용하였다. 압축된 구리 폼은 앞서 제작한 무유로 분리판에 적용하였으며, 음극과 양극에 동일한 매니폴드 크기를 가지는 금속 폼 유로를 적용하였다. Figure 5에는 본 연구에서 사용한 5채널 사형 유로와 금속 폼 유로를 나타내었다.

본 연구에서 막 전극 접합체(Membrane Electrode Assembly, MEA)는 Gore사의 전해질 막을 사용하며 음극과 양극의 백금 함량이  $0.4 \text{ mg/cm}^2$ , 전극 면적  $25 \text{ cm}^2$ 의 G-type MEA(CNL Energy, Korea)를 사용하였다. 또한, 기체확산층은 두께  $250 \text{ um}$ 의 JNT20-A3(JNTG, Korea)를 사용하였으며, 단위전지는  $100 \text{ kgf}\cdot\text{cm}$ 의 압력으로 체결하였다.

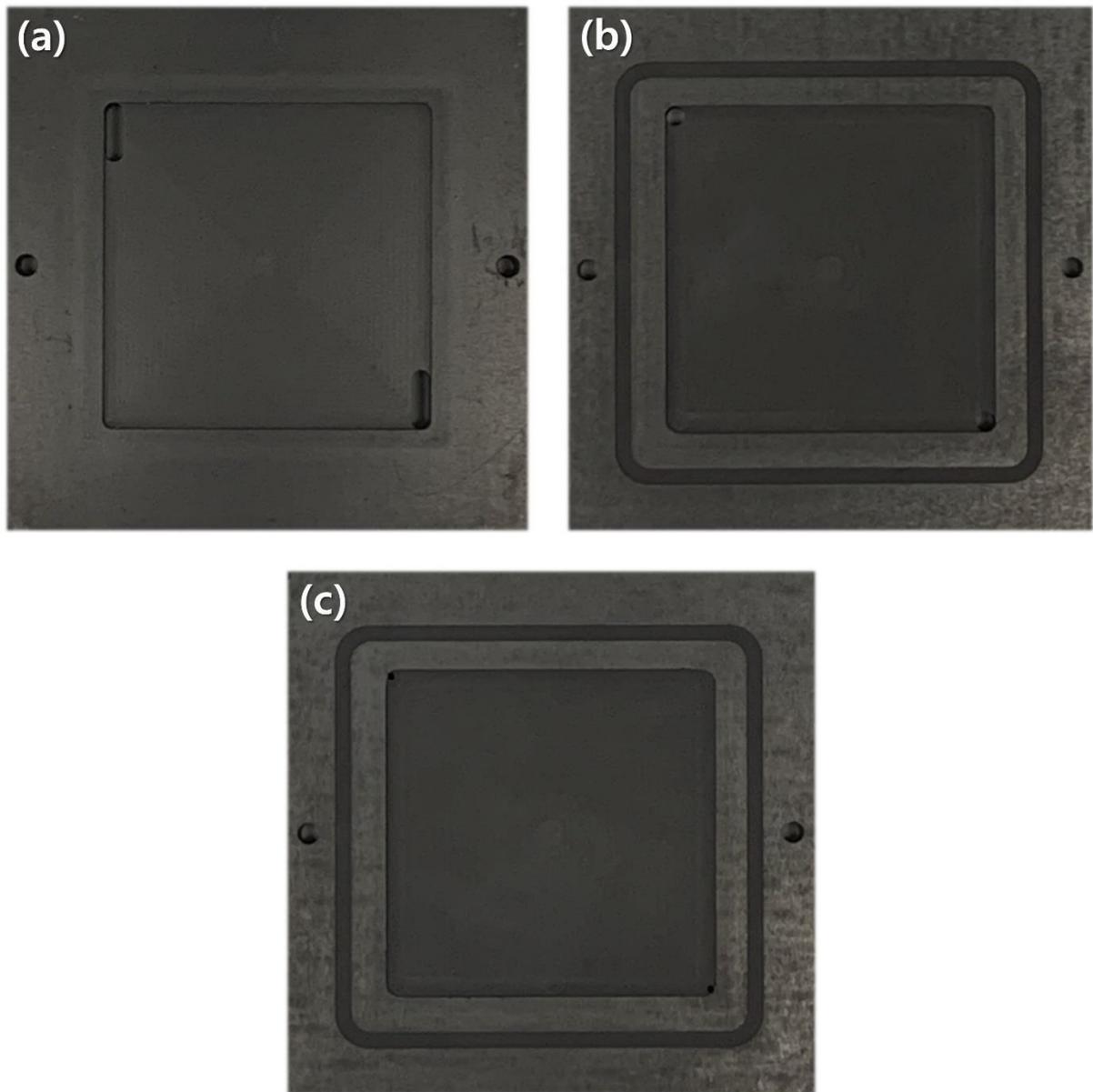


Figure 4. Photographs of bipolar plates with different manifold sizes.  
(a) S1 (3 mm x 9 mm) (b) S2 (3 mm x 3 mm) (c) S3 (1 mm x 1 mm).

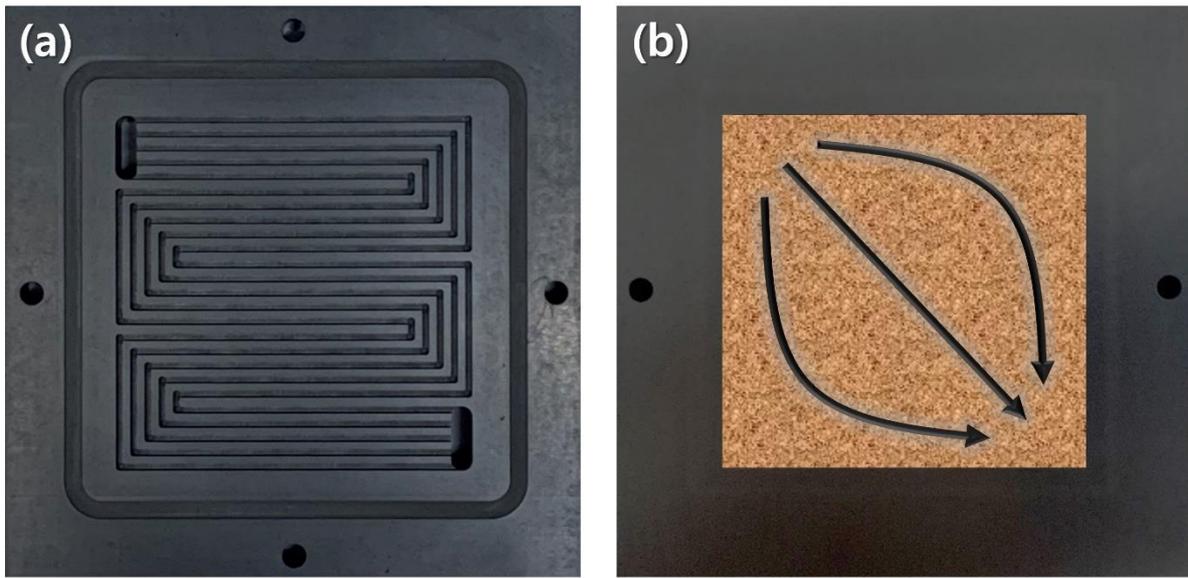


Figure 5. Photographs of different flow field types.  
(a) Serpentine flow field (b) Metal foam flow field.

### 2.3. 전기화학적 분석

PEMFC의 성능 평가에 앞서 개방회로전압(Open Circuit Voltage, OCV)과 0.5 V 사이의 전압 순환 활성화 과정을 30 회 반복하여 성능을 안정화하였다. 단위전지 평가는 65 °C의 온도에서 수행하였다. 또한, 반응물의 상대습도 및 화학양론비의 영향을 분석하기 위해 상대습도는 각각 25, 100%, 화학양론비는 수소는 1.5(음극), 공기의 경우 각각 2.0, 3.0, 4.0(양극)에 해당하는 조건에서 평가하였다. 반응물의 온도 및 습도는 버블형 가습기(CNL Energy, Korea)를 사용하여 제어하였고, 질량유량제어기(Kofloc, Japan)를 사용하여 반응물의 유량을 제어하였다. 활성화 과정 이후 분극 곡선은 각 부하 전류에서 1 분간 측정하였으며, 전압은 2 Hz 간격으로 측정하였다. 단위전지의 전류 및 전압은 전자부하장치(Prodigit, Taiwan)로 제어하였으며, 모든 장비는 데이터 수집(data acquisition, DAQ) 장치인 USB-6221(National Instruments, USA)과 LabVIEW 소프트웨어(National Instruments, USA)를 이용하여 PC와 통신 및 제어하였다.

전기화학 임피던스 분광법(Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS)은 ZIVE ZB2, SP5(WonATech, Korea) 장비를 사용하여 측정하였으며, 수소와 공기는 전류밀도 2000 mA/cm<sup>2</sup>에서 각각 화학양론 1.5, 2.0에 해당하는 유량으로 공급하였다. 또한, EIS 측정은 0.1 Hz – 10 kHz의 주파수 범위에서, 전류를 2.5 A에서 50 A까지 2.5 A씩 증가하며 측정하였다. Table 2에 단위전지 구성 및 평가 조건에 대하여 나타내었다.

Table 2. Specification of PEMFC and experimental conditions.

Parameter	Value
Active area (cm <sup>2</sup> )	25
Membrane	Gore
GDL	JNT20-A3
Pt loading of anode/cathode (mg/cm <sup>2</sup> )	0.4/0.4
Flow field	Serpentine, Metal foam
Temperature (°C)	65
Stoichiometry of Hydrogen	1.5
Stoichiometry of Air	2.0, 3.0, 4.0
Relative humidity (%)	25, 100
Tightening torque (kgf-cm)	100

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 고습도 조건에서의 매니폴드 크기 영향

금속 폼 유로에서 매니폴드 크기가 연료전지 성능에 미치는 영향을 분석하기 위해서는 구리 폼에 의한 저항 손실을 배제한 연료전지 성능을 비교할 필요가 있다. 오믹 저항의 경우 상대습도 100%인 고습도 조건에서는 부하전류에 따라 대체로 일정한 값을 가진다. 따라서 전류밀도  $100 \text{ mA/cm}^2$  -  $600 \text{ mA/cm}^2$  범위에서의 오믹 저항 평균값으로 저항 손실을 보상하였으며, Figure 6 에 저항 손실을 배제한 분극 곡선을 나타내었다. 사형 유로에서는 상대적으로 낮은 전류밀도에서 물질 전달에 의한 급격한 전압 강하를 보였다. 금속 폼 유로의 경우 낮은 전류밀도에서는 매니폴드 크기에 관계없이 유사한 성능을 보였다. 하지만 고전류밀도에서 물질 전달에 의한 전압 손실 차이가 나타났으며, 매니폴드 크기와 비례하지 않고 S2 에서 가장 높은 성능을 보였다.

Figure 7 에  $0.2, 1.2 \text{ A/cm}^2$ 에서 측정한 Nyquist plot 을 나타내었다. Figure 7(a)에서 전하 전달 저항은 사형 유로의 경우 약  $330 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ , 금속 폼 유로의 경우 매니폴드 크기와 관계없이 약  $280 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$  를 나타내었다. Figure 7(b)의 사형 유로에서 큰 반원은 물질 전달 저항의 영향으로 고려되며, 전하 전달 및 물질 전달 저항 값은 S1, S2, S3, 사형 유로에서 각각  $189.0, 147.3, 164.6, 1174.4 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$  로 측정되었다. 따라서 금속 폼 유로에서 매니폴드 크기가 물질 전달 손실에 주로 영향을 미치는 것으로 고려된다.

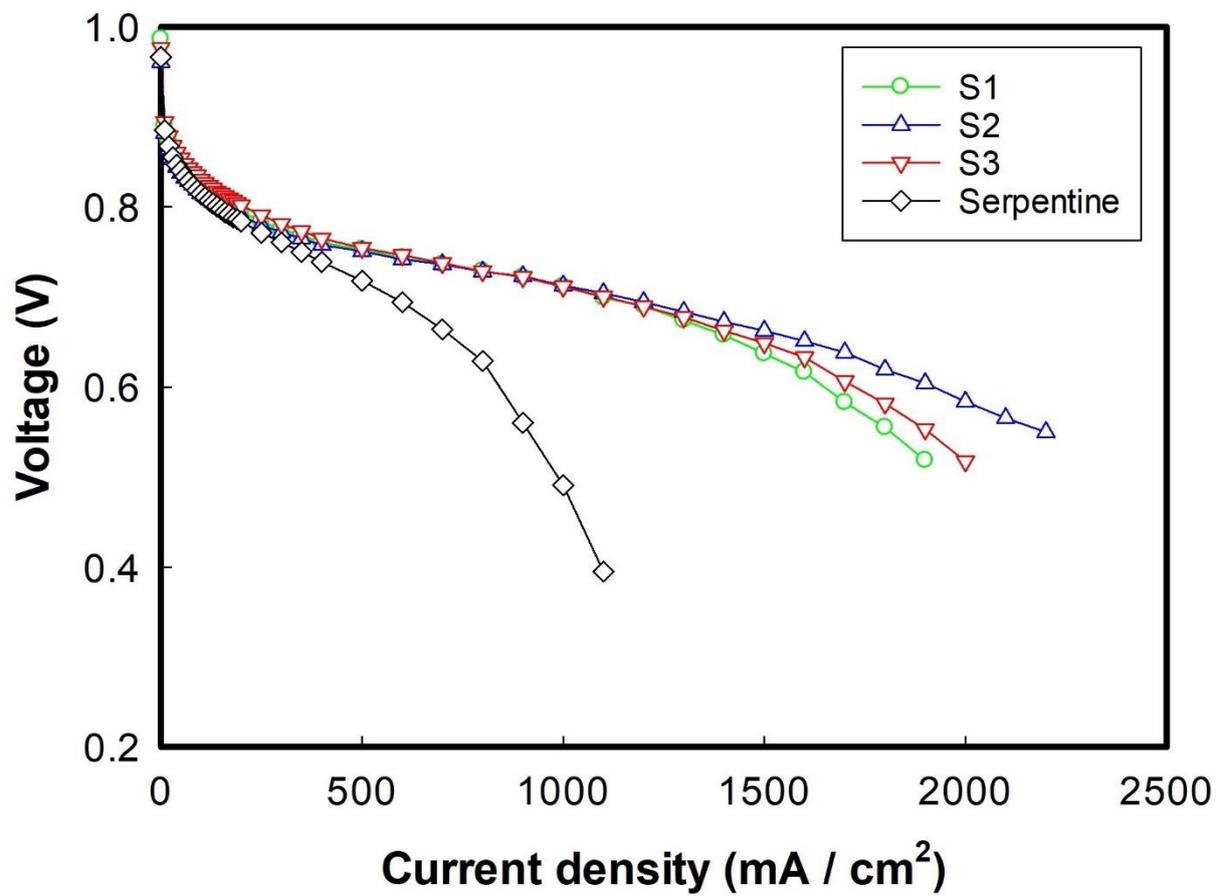


Figure 6. IR-corrected polarization curves with different manifold sizes at 100% relative humidity condition.

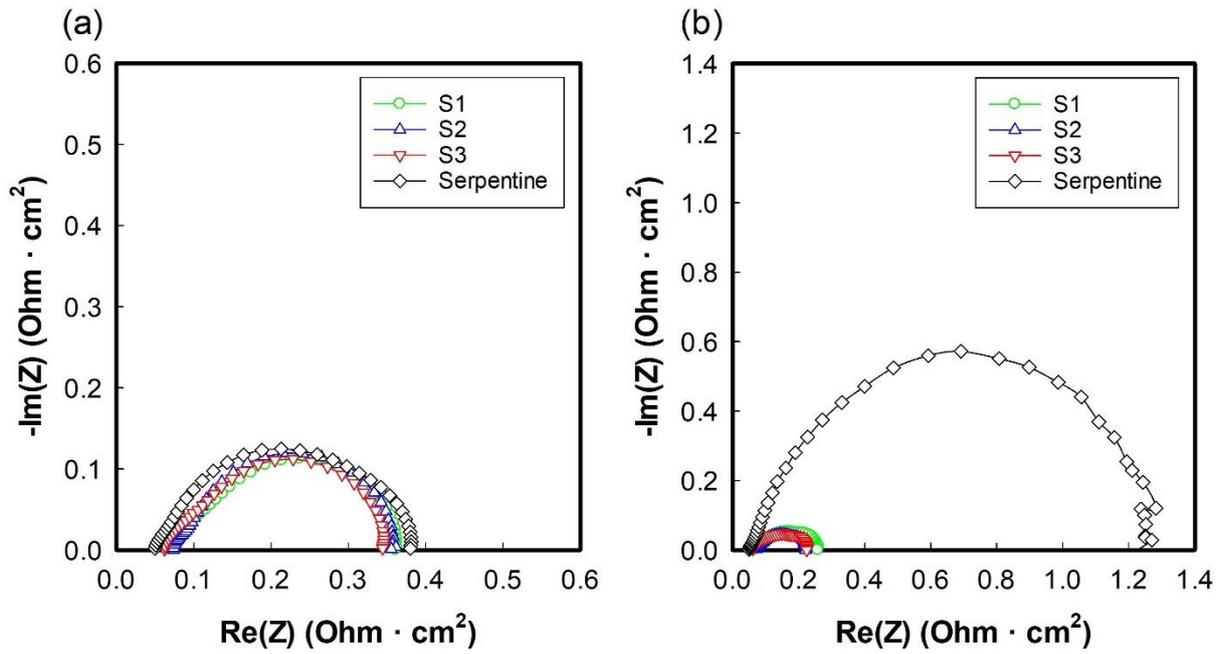


Figure 7. Nyquist plots with different manifold sizes at 100% relative humidity condition.

(a) 0.2 A/cm<sup>2</sup> (b) 1.2 A/cm<sup>2</sup>

금속 폼 유로에서 매니폴드 크기가 연료전지 성능에 미치는 영향을 분석하기 위해 1.2 A/cm<sup>2</sup>에서의 오믹, 전하 전달 및 물질 전달 저항과 유량 1660 sccm에서의 압력 손실을 측정하여 Figure 8에 나타내었다. 매니폴드 크기가 작아질수록 압력 손실이 증가하였으며, 전하 전달 저항 및 물질 전달 저항은 매니폴드 크기와 비례하지 않았다. 부하전류에 따라 저항의 경향을 파악하기 위해 100 mA/cm<sup>2</sup> – 2000 mA/cm<sup>2</sup>의 전류밀도 범위에서 전하 전달 및 물질 전달 저항을 측정하였으며 Figure 9에 나타내었다. 이론적으로 전류밀도가 증가하게 되면 전하 전달 저항은 감소하고 물질 전달 저항은 증가한다. 따라서 Figure 9에서의 저항이 증가하는 것은 물질 전달 저항에 의한 영향으로 고려할 수 있다. 사형 유로에서는 비교적 낮은 전류밀도에서 물질 전달 손실에 의해 저항이 크게 증가하는 것을 확인하였다. 금속 폼 유로에서는 물질 전달 손실의 영향이 적은 전류밀도 1000 mA/cm<sup>2</sup> 이하에서는 전하 전달 저항이 유사하였다. 반면, 전류밀도 1200 mA/cm<sup>2</sup> 이상에서는 S1, S3, S2 순으로 저항이 증가하였다. 일반적으로 압력 손실이 높으면 연료전지의 생성수 배출에 이점이 있어 물질 전달 저항이 감소하지만, S3가 압력 손실이 더 높음에도 불구하고 고전류밀도에서 S2에 비해 큰 저항을 보였다. 따라서 S3의 출구 매니폴드 크기는 고전류밀도에서 발생하는 다량의 생성수를 배출함에 있어서 충분하지 않은 것으로 고려된다.

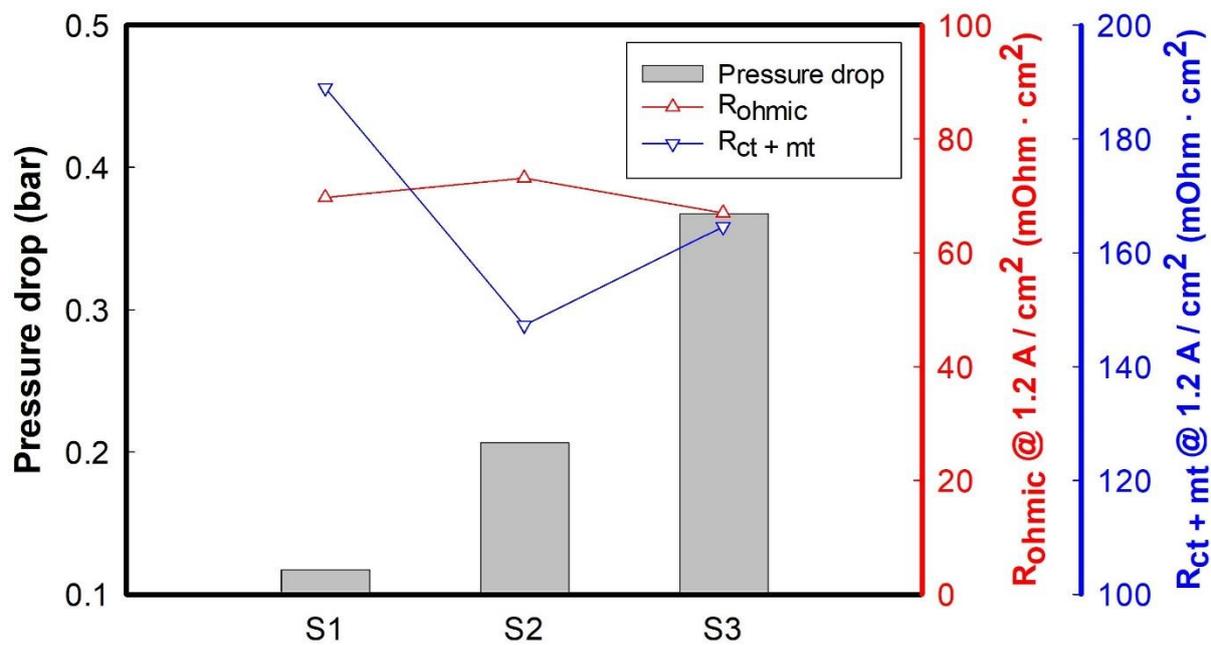


Figure 8. Differences in pressure drop at 1660 sccm, (Left)  
ohmic, charge transfer and mass transfer resistance at 1.2 A/cm<sup>2</sup>. (Right)

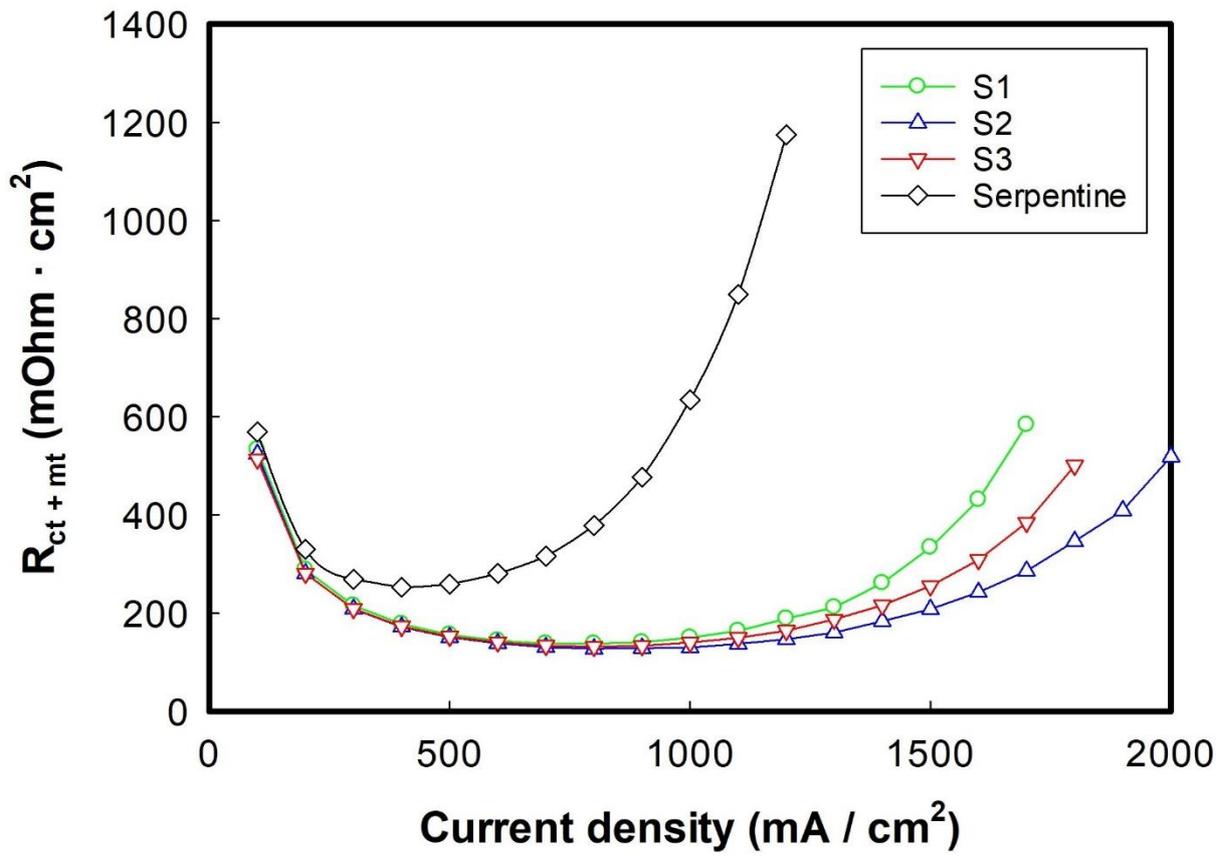


Figure 9. Charge transfer and mass transfer resistance with different manifold sizes at 100% relative humidity condition.

### 3.2. 저습도 조건에서의 매니폴드 크기 영향

PEMFC의 성능을 최적화하고 내구성을 보장하기 위해서 물 관리는 필수적이다. 연료전지에 공급되는 반응물 기체의 상대습도가 높으면 전해질 막 이온 전도도와 촉매 전극 활성을 증가시킬 수 있다. 하지만 연료전지 반응에 의해 발생된 생성수가 효과적으로 배출되지 않으면 플러딩이 발생할 수 있으며, 이는 반응물 기체가 전극으로 공급되는 것을 방해하여 성능이 저하될 수 있다. 또한, 양성자 전도도는 촉매층과 전해질 막의 수분 함량에 따라 달라지기 때문에 PEMFC 성능은 반응물 기체 상대습도의 영향을 받는다.

금속 폼 유로에서 매니폴드 크기에 따른 분극 곡선을 상대습도 25%에서 측정하였고, 이는 Figure 10에 나타내었다. 반응물 기체의 상대습도가 낮은 경우에는 금속 폼 유로에서 매니폴드 크기에 따른 연료전지 성능에 큰 차이가 없었다. Figure 11에 0.4, 1.2 A/cm<sup>2</sup>에서 측정한 Nyquist plot을 나타내었다. 저습도 조건에서 사형 유로는 전류밀도 700 mA/cm<sup>2</sup>까지 금속 폼 유로에 비해 더 높은 성능을 보였는데, 이는 상대적으로 낮은 오믹 저항에 의한 것으로 고려된다. 고전류밀도에서는 고습도 조건과 마찬가지로 물질 전달 손실의 영향으로 사형 유로에서 급격한 전압 손실을 보였다.

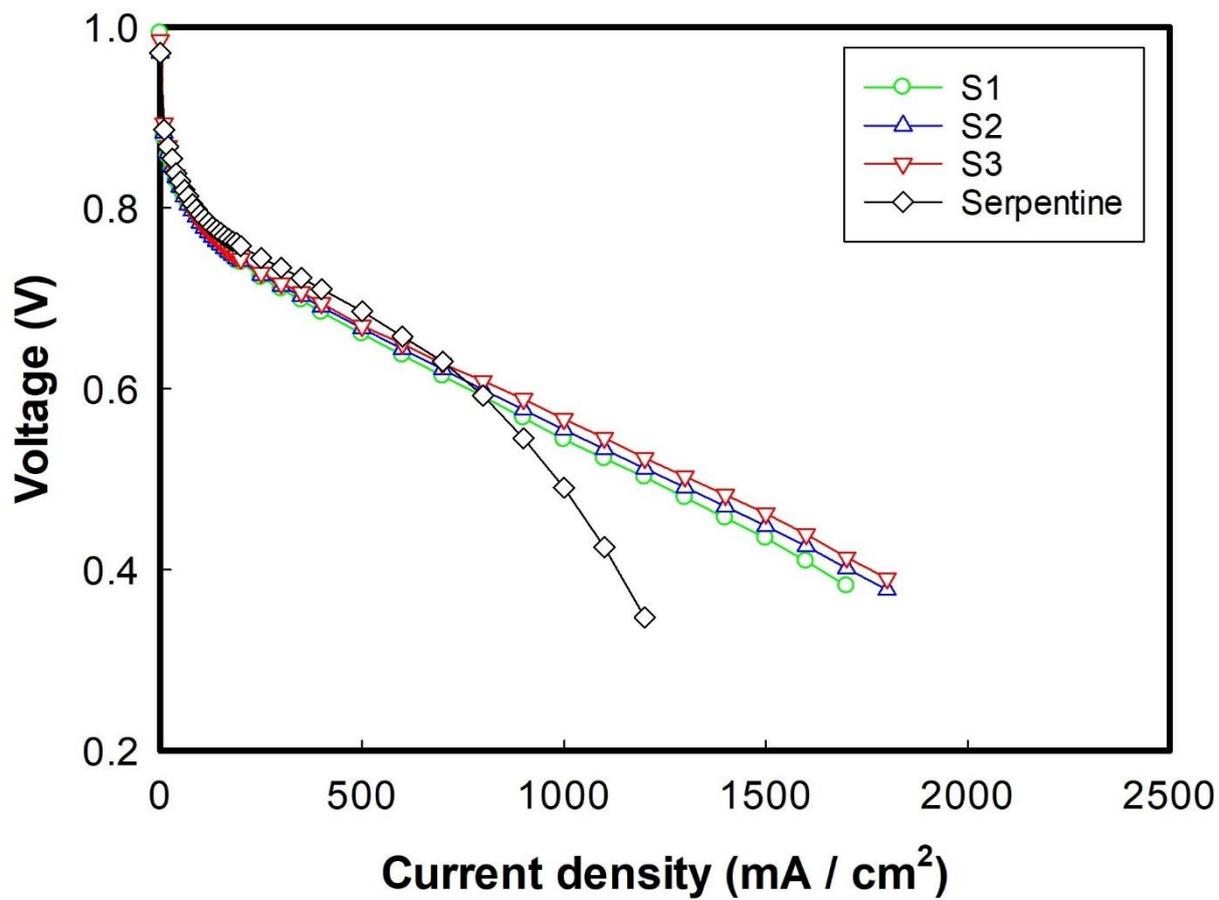


Figure 10. Polarization curves with different manifold sizes at 25% relative humidity condition.

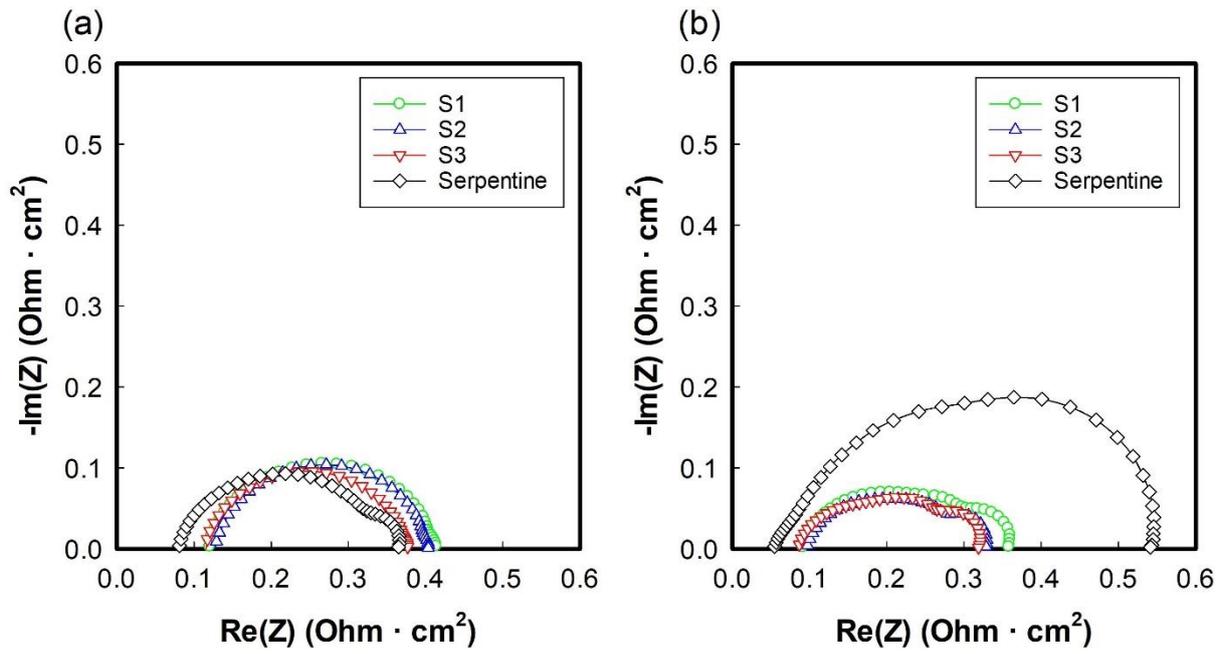


Figure 11. Nyquist plots with different manifold sizes at 25% relative humidity condition.

(a)  $0.4 \text{ A/cm}^2$  (b)  $1.2 \text{ A/cm}^2$

상대습도 조건에서 전해질 막 및 촉매층의 수화 영향을 비교하기 위해 상대습도 25, 100%에서 전류밀도에 따른 오믹 저항 경향을 Figure 12 에 나타내었다. 상대습도 100%에서는 전해질 막 및 촉매층이 충분히 수화되어 전류밀도와 관계없이 오믹 저항은 일정하게 유지되었다. 반면, 상대습도 25%인 저습도 조건에서는 전류밀도가 증가할수록 오믹 저항이 감소하였는데, 이는 다량의 물이 전해질 막 및 촉매층에 공급되어 이온 전도도가 증가한 것으로 고려된다. 사형 유로와 금속 폼 유로의 오믹 저항 차이는 상대습도 100%에서 약  $22 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ , 상대습도 25%에서는 약  $39 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$  로 측정되었다. 이러한 차이는 저습도 조건에서 사형 유로에 비해 금속 폼 유로에서 이오노머 및 전해질 막의 수화도가 낮은 것으로 고려할 수 있는데, 이는 금속 폼 유로의 경우 립 아래 영역에서의 수분 응축이 거의 없고, 구리 폼의 소수성 및 3 차원 기공 구조로 인해 생성수가 원활하게 배출되기 때문이다. 또한, 저습도 조건에서는 오믹 저항의 차이는 매니폴드 크기에 따른 이온 전도도 영향에 비해 구리 폼과의 접촉 저항에 의한 영향이 큰 것으로 확인되었다.

Figure 13 에 상대습도 25%, 전류밀도  $100 \text{ mA}/\text{cm}^2 - 1700 \text{ mA}/\text{cm}^2$  범위에서 EIS 측정을 수행하여 전하 전달 및 물질 전달 저항을 나타내었다. 저습도 조건에서의 물질 전달 저항은 고습도 조건보다 낮았으며, 낮은 촉매 활성으로 인해 전하 전달 저항은 더 높았다. 매니폴드 크기에 따른 저항 경향은 저습도 조건에서 금속 폼 유로의 경우 물질 전달 손실의 영향이 적어 명확한 차이가 나타나지 않았다.

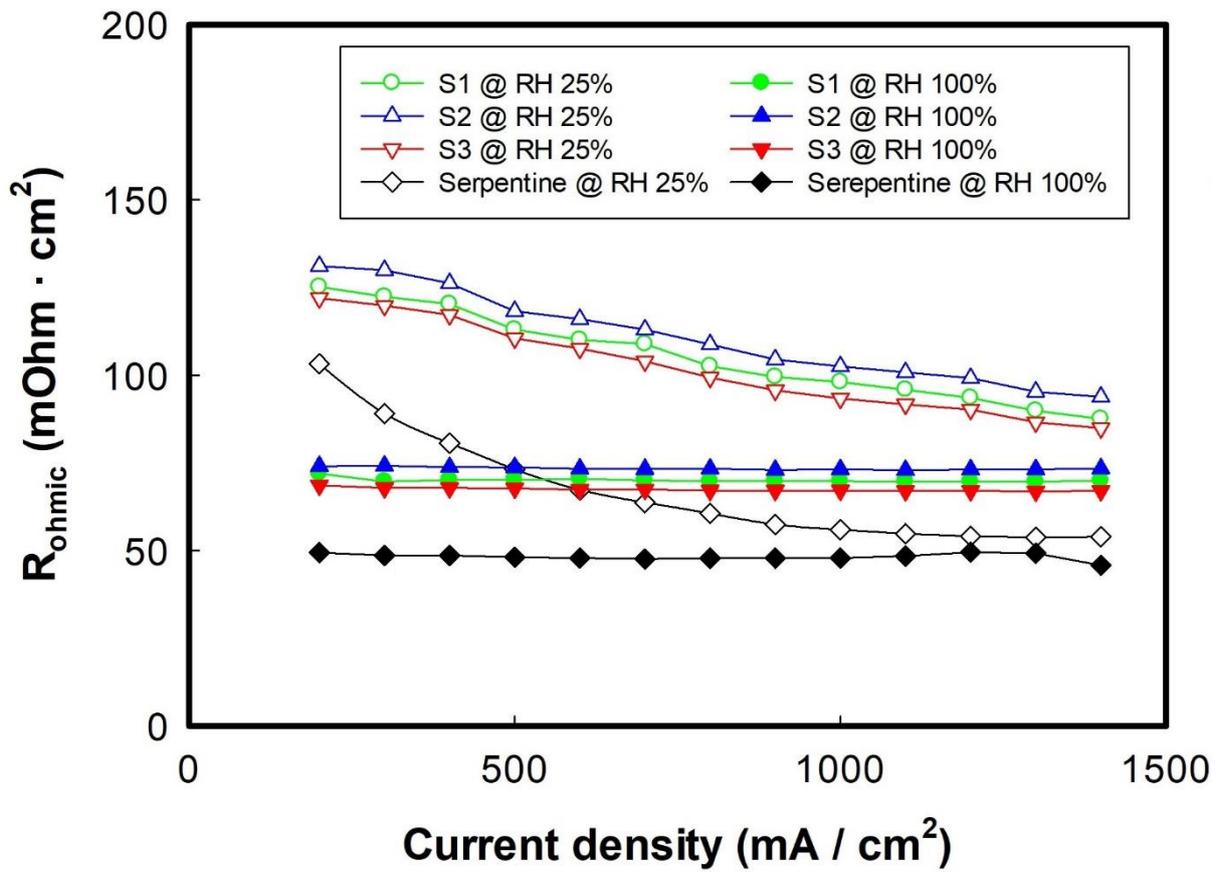


Figure 12. Ohmic resistance with different manifold sizes.

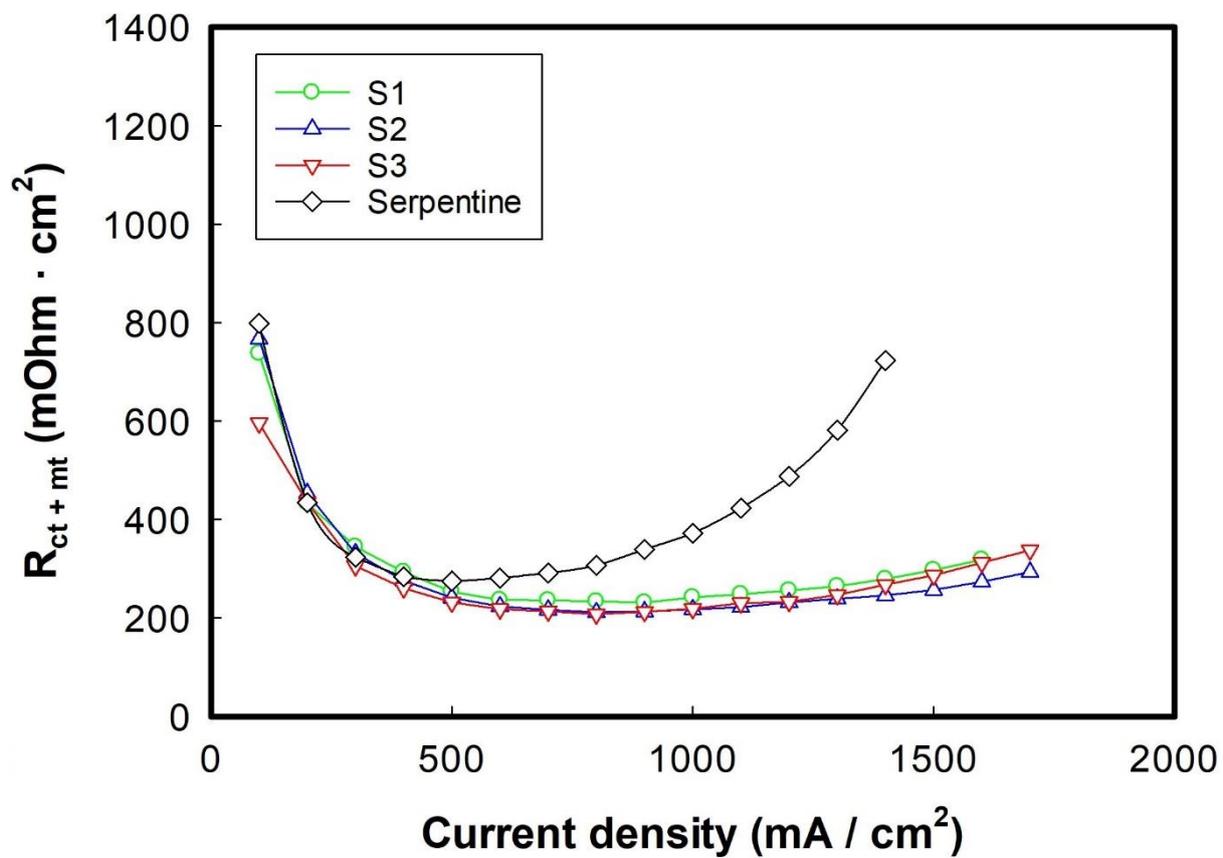


Figure 13. Charge transfer and mass transfer resistance with different manifold sizes at 25% relative humidity condition.

### 3.3. 화학양론비에 대한 매니폴드 크기 영향

#### 3.3.1 고습도 조건

반응물 기체의 화학양론이 금속 폼 유로에서 매니폴드 크기에 따라 연료전지 성능에 미치는 영향을 분석하기 위해 공기의 화학양론비를 조절하였다. 고전류밀도에서 물질 전달 손실에 의한 전압 손실이 지배적이고, 이는 주로 양극에서의 반응물 공급의 영향이 크기 때문에 공기의 화학양론비 2.0, 3.0, 4.0에서 측정된 분극 곡선을 Figure 14에 나타내었다. 또한 Figure 15에는 유량 5000 sccm까지 매니폴드 입구와 출구 사이의 압력 손실을 측정하여 나타내었다. 공기의 화학양론을 증가시키면 저전류밀도에서는 물질 전달이 전압 손실에 지배적이지 않기 때문에 성능 변화 영향이 미미했으나, 고전류밀도에서는 화학양론비에 따라 성능이 크게 향상되었다.

Table 3에는 각 샘플에서의 0.8, 0.6, 0.4 V에서의 전류밀도를 나타내었다. 공기 화학양론비가 2.0에서 4.0으로 증가함에 따라 S1, S2, S3의 전류밀도는 0.6 V에서 각각 1225.2, 1229.7, 1292.3 mA/cm<sup>2</sup>에서 1364.1, 1363.3, 1639.8 mA/cm<sup>2</sup>로 증가하였다. 또한 0.4 V에서는 전류밀도가 1865.8, 2142.9, 1990.4 mA/cm<sup>2</sup>에서 2410.9, 2754.1, 3104.2 mA/cm<sup>2</sup>로 증가하였다. 0.4 V에서 공기의 화학양론비가 2.0인 경우, S3의 성능은 물질 전달 손실로 인해 S2보다 낮았지만, 공기 화학양론비 3.0 이상에서 성능이 크게 향상되어 역전되는 것을 확인하였다. 이는 S3에서 공기의 화학양론비 및 유량 증가 시, 압력 손실이 다른 샘플에 비해 크게 증가하여 생성수 배출 한계를 극복하고 물질 전달 손실이 개선된 것으로 고려된다. Figure 16에는 공기의 화학양론비 영향을 매니폴드 크기에 따른 성능 비교를 위한 분극 곡선을 나타내었다.

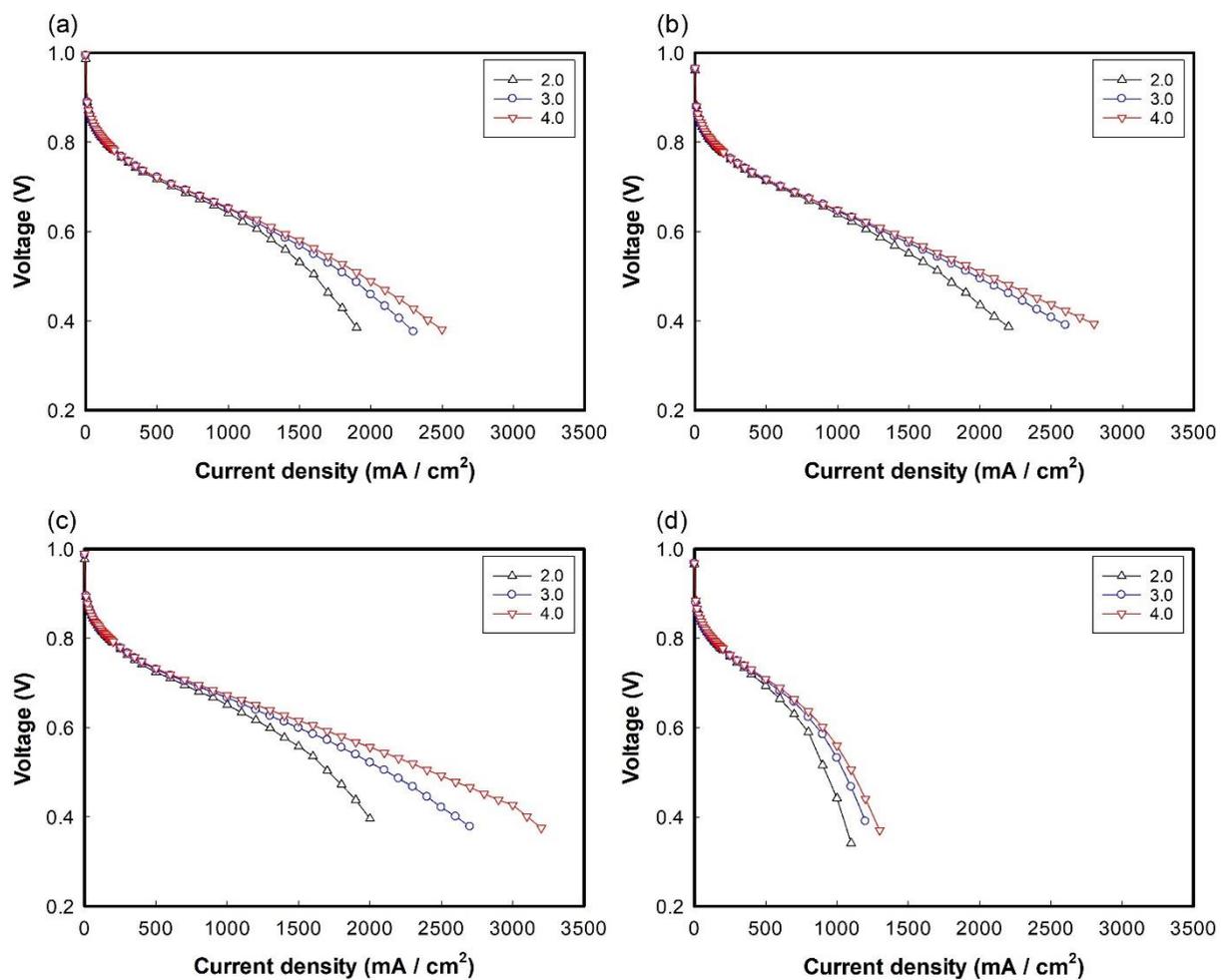


Figure 14. Polarization curves with different manifold sizes, air stoichiometry at 100% relative humidity condition. (a) S1 (b) S2 (c) S3 (d) Serpentine.

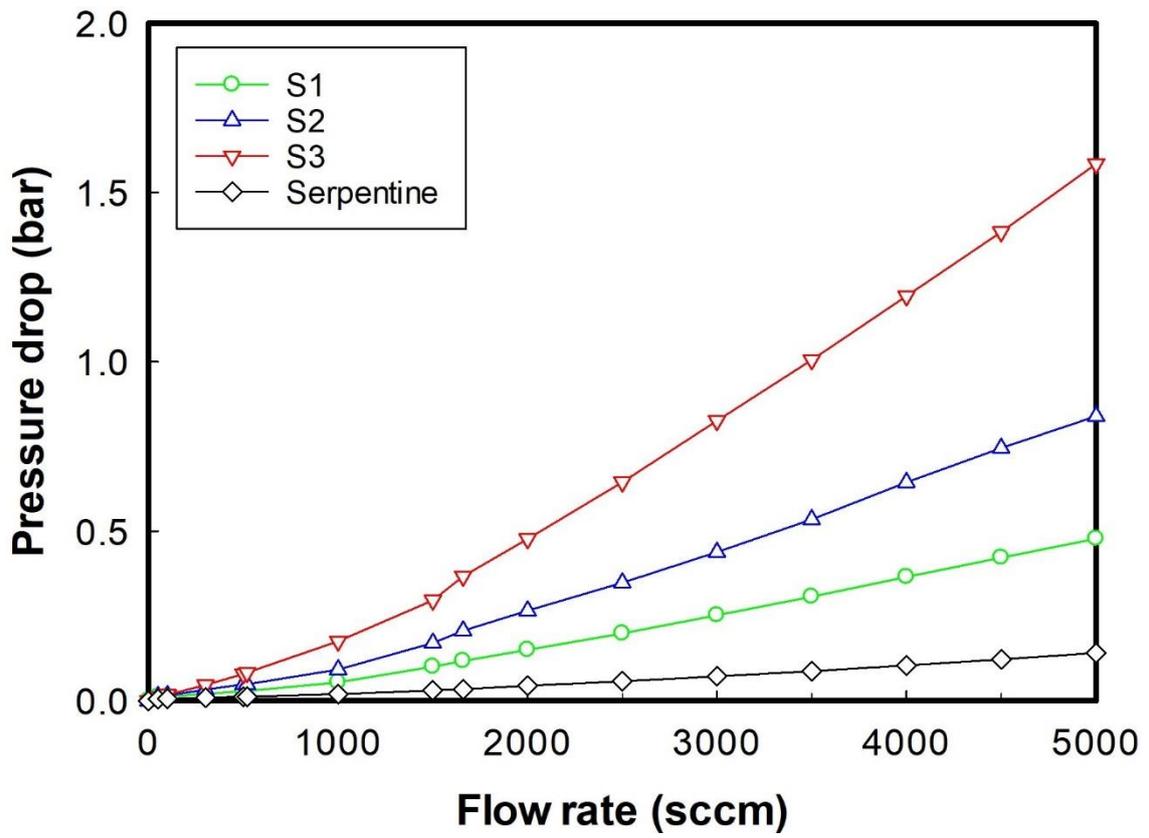


Figure 15. Pressure drop with different manifold sizes.

Table 3. Cell performance with air stoichiometry and manifold size at 100% relative humidity condition.

Current Density (mA/cm <sup>2</sup> )										
Voltage (V)		0.8			0.6			0.4		
Samples	Air stoi.	2	3	4	2	3	4	2	3	4
	Serpentine		123.2	124.8	128.1	775	860.6	903.6	1041.8	1187.5
S1		140.8	143.5	144.7	1225.2	1314.3	1364.1	1865.8	2219.2	2410.9
S2		123.8	128.4	126.3	1229.7	1325.2	1363.3	2142.9	2546.2	2754.1
S3		166.8	174.6	175.2	1292.3	1495.7	1639.8	1990.4	2604	3104.2

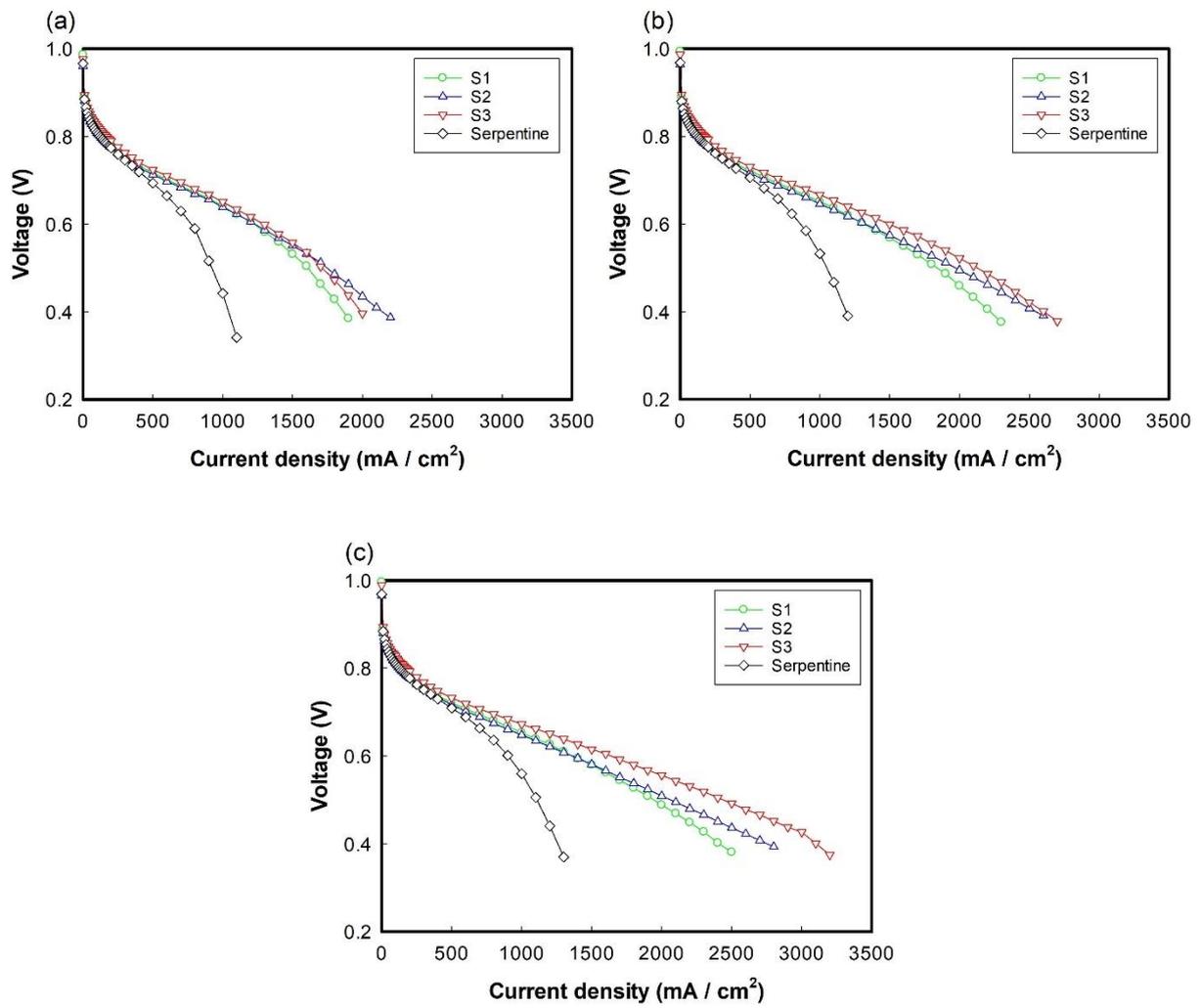


Figure 16. Polarization curves with different manifold sizes, air stoichiometry at 100% relative humidity condition. (a) Air stoichiometry 2.0 (b) 3.0 (c) 4.0

### 3.3.2 저습도 조건

저습도 조건에서 반응물 기체의 화학양론이 연료전지 성능에 미치는 영향을 분석하기 위해 상대습도 25%에서 마찬가지로 공기의 화학양론비를 2.0, 3.0, 4.0에서 측정된 분극 곡선을 Figure 17에 나타내었다. Table 4에는 0.4 V에서 각 샘플의 전류밀도를 나타내었다. 공기 화학양론비가 2.0에서 4.0으로 증가함에 따라 S1, S2, S3의 전류밀도는 0.4 V에서 각각 1641.8, 1813.0, 1883.4 mA/cm<sup>2</sup>에서 1711.2, 1845.3, 2381.9 mA/cm<sup>2</sup>로 증가하였다. S1, S2는 공기의 화학양론 변화에도 유사한 성능을 보였는데, 금속 폼 유로에서 공기의 화학양론비가 2.0인 경우 물질 전달 손실에 의한 급격한 전압 강하를 보이지 않고, 저습도 조건에서는 상대적으로 물질 전달 손실의 영향이 적기 때문에 화학양론의 영향이 미미한 것으로 고려된다. S3의 경우는 S1, S2와 다르게 고전류밀도에서 성능이 일정 수준 향상되었다. 이는 고습도 조건과 같이 화학양론 및 유량 증가에 따른 압력 손실이 다른 샘플에 비해 크게 증가되어 물질 전달 손실이 개선된 것으로 고려된다.

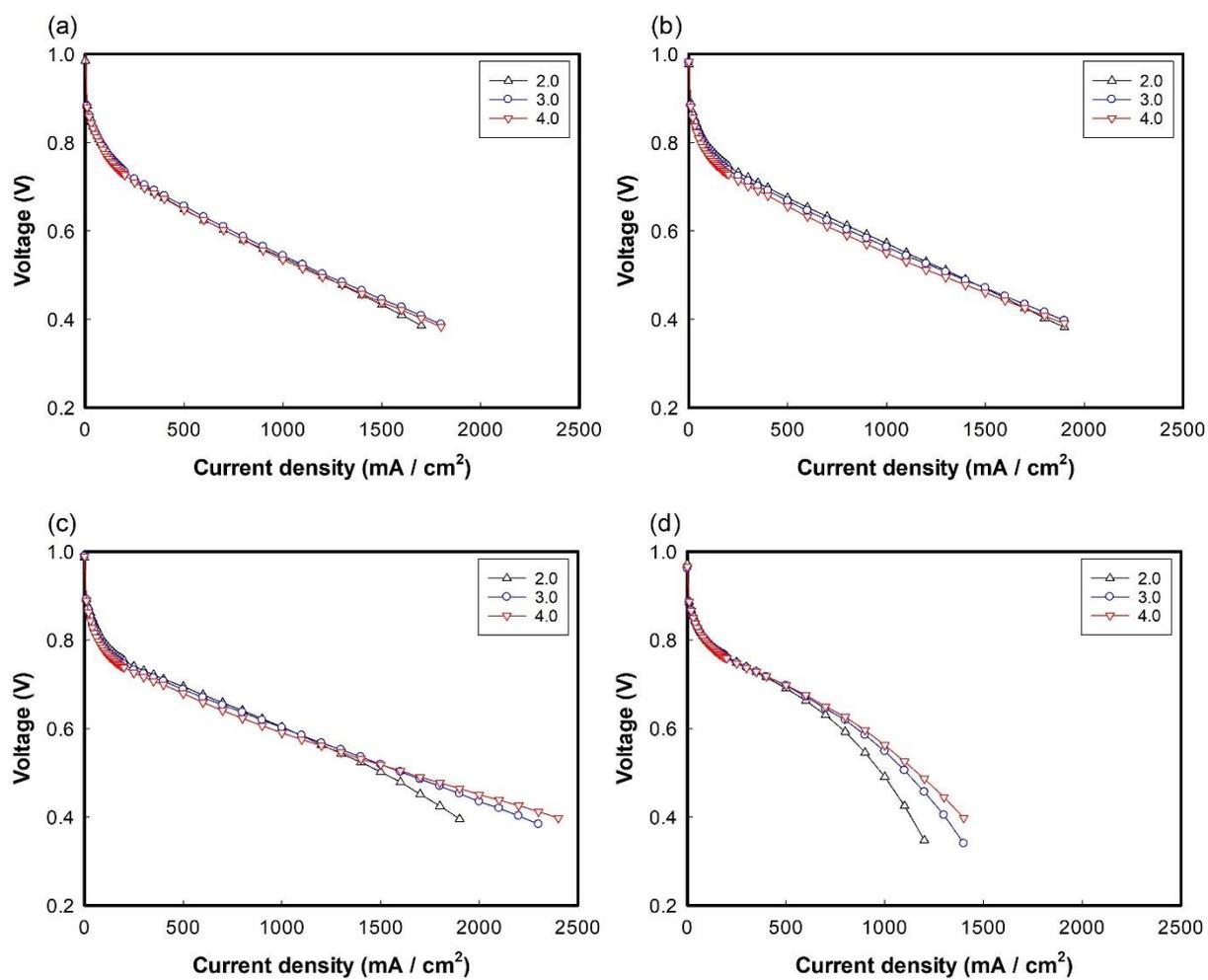


Figure 17. Polarization curves with different manifold sizes, air stoichiometry at 25% relative humidity condition. (a) S1 (b) S2 (c) S3 (d) Serpentine.

Table 4. Cell performance with air stoichiometry and manifold size at 25% relative humidity condition.

		Current Density (mA/cm <sup>2</sup> )		
Voltage (V)		0.4		
Samples	Air stoi.	2	3	4
	Serpentine		1132.3	1306.4
S1		1641.8	1742.1	1711.2
S2		1813.0	1885.9	1845.3
S3		1883.4	2211.2	2381.9

#### 4. 결론

본 연구에서는 금속 폼 유로에서 매니폴드 크기에 따른 성능 평가 실험을 수행하였다. 구리 폼을 초기 두께 800  $\mu\text{m}$ 에서 500  $\mu\text{m}$ 으로 압축 후, 반응 면적 25  $\text{cm}^2$ , 매니폴드 크기 3 mm x 9 mm, 3 mm x 3 mm, 1 mm x 1 mm인 무유로 분리판에 적용하여 습도 및 화학양론비 조건에 따른 연료전지 성능을 비교하였다.

상대습도 100%인 고습도 조건에서는 사형 유로의 경우 금속 폼 유로에 비해 상대적으로 낮은 전류밀도에서 물질 전달 손실로 인한 급격한 전압 강하를 보였다. 금속 폼 유로는 폼 내부에서 발생하는 압력으로 인해 전하 전달 및 물질 전달 손실이 감소하여 점진적인 전압 감소를 보였다. 고습도 조건의 분극 곡선에서 저전류밀도에서는 성능에 큰 차이가 없었지만, 고전류밀도의 경우 S1, S3에 비해 S2의 성능이 더 우수하였다. 이는 S3의 압력 손실이 높았음에도 불구하고, 매니폴드 크기가 작아 고전류에서 발생한 다량의 생성수를 적절히 배출하지 못하여 물질 전달 손실이 높은 것으로 고려된다.

상대습도 25%인 저습도 조건에서는 매니폴드 크기에 따른 명확한 성능 차이를 보이지 않았다. 금속 폼 유로의 경우 구리 폼의 소수성, 높은 압력 손실, 3차원 기공 구조 등으로 인해 저습도 조건에서 촉매층 및 전해질 막의 수화도가 사형 유로에 비해 낮은 것으로 확인되었다. 또한, 매니폴드 크기에 따른 전해질 막, 촉매층의 수화도 차이는 미미하였다.

수소의 화학양론비를 고정하고 공기의 화학양론비를 2.0에서 4.0까지 변화시킨 결과, 고습도 조건에서 매니폴드 크기가 가장 작은 S3는 화학양론비 2.0에서 고전류밀도의 성능이 S1, S2에 비해 낮았다. 그러나 화학양론비가 증가함에 따라 성능이 크게 향상되어, 화학양론비가 3 이상에서는 S3의 성능이 가장 높았다. 반면, 저습도 조건에서는 화

학양론비의 영향이 미미했으며, S3의 경우에만 일정 수준의 성능 향상을 나타내었다.

저습도 조건에서는 금속 폼 유로에서 연료전지 성능에 대한 매니폴드 크기의 영향이 적었다. 하지만 고습도 조건에서 적절한 매니폴드 크기는 물질 전달 손실을 감소시켜, 주로 고전류밀도에서 성능을 개선하였다. 금속 폼 유로에서 물질 전달 손실을 감소하기 위해서는 각 연료전지 적용 분야에 알맞게 적절한 매니폴드 크기를 확보해야 한다. 금속 폼 유로를 적용하여 고전류밀도 영역에서 매니폴드 크기를 최적화함으로써 연료전지의 수소 연료 효율을 향상시켰다.

## 5. 참고문헌

- [1] A. Schafer, J.B. Heywood, M.A. Weiss, *Energy* 31 (2006) 2064–2087.
- [2] Veluswamy HP, Kumar R, Linga P, *Appl Energy* 122 (2014) 112–132.
- [3] K. Jiao, J. Xuan, Q. Du, Z. Bao, B. Xie, B. Wang, Y. Zhao, L. Fan, H. Wang, Z. Hou, S. Huo, N. Brandon, Y. Yin, M. Guiver, *Nature* 595 (2021) 361–369.
- [4] Fan L, Tu Z, Chan SH, *Int J Hydrogen Energy* 48 (2023) 7828–7865.
- [5] Wang Y, Chen KS, Mishler J, Cho SC, Adroher XC, *Appl Energy* 88 (2011) 981-1007.
- [6] Hwang, S., Lee, H.G., Jeong, Y.G., Choi, C., Hwang, I., Song, S.H., Nam, S.Y., Lee, J.H., Kim, K., *Int J Mol Sci* 23 (2022) 14252.
- [7] Qin Y, Liu G, Chang Y, Du Q, *Appl Therm Eng* 144 (2018) 411-423.
- [8] Okonkwo PC, Ben Belgacem I, Emori W, Uzoma PC, *Int J Hydrogen Energy* 46 (2021) 27956-27973.
- [9] Etesami M, Mehdipour-Ataei S, Somwangthanaroj A, Kheawhom S, *Int J Hydrogen Energy* 47 (2022) 41956-41973.
- [10] Thompson ST, James BD, Huya-Kouadio JM, Houchins C, DeSantis DA, Ahluwalia R, Papageorgopoulos D, *J Power Sources* 399 (2018) 304-313.
- [11] Hermann A, Chaudhuri T, Spagnol P, *Int J Hydrogen Energy* 30 (2005) 1297-1302.
- [12] X. Gao, J. Chen, R. Xu, Z. Zhen, X. Zeng, X. Chen, L. Cui, *Int J Hydrogen Energy* 50 (2024) 711–743.
- [13] A. Tang, L. Crisci, L. Bonville, J. Jankovic, *J Renew Sustain Energy* 13 (2021), 022701.
- [14] M. Kim, C. Kim, Y. Sohn, *Fuel Cells* 18 (2018) 123–128.
- [15] Shimpalee S, Van Zee JW, *Int J Hydrogen Energy* 32 (2007) 842-856.
- [16] Y. Zhang, Y. Tao, J. Shao, *J Power Sources* 492 (2021) 229664.
- [17] Yuan W, Tang Y, Yang X, Wan Z, *Appl Energy* 94 (2012) 309-329.
- [18] W.C. Tan, L.H. Saw, H.S. Thiam, J. Xuan, Z. Cai, M.C. Yew, *Renew Sustain Energy Rev* 96 (2018) 181-197.

- [19] Carton JG, Olabi AG, Energy 136 (2017) 185–195.
- [20] Azarafza A, Ismail MS, Rezakazemi M, Pourkashanian M, Renew Sustain Energy Rev 116 (2019) 109420.
- [21] Shin DK, Yoo JH, Kang DG, Kim MS, Renew Energy 115 (2018) 663-675.
- [22] Suo M, Sun K, Chen R, Che Z, Zeng Z, Li Q, Tao X, Wang T, J Power Sources 521 (2022) 230937.
- [23] J.E. Park, W. Hwang, M.S. Lim, S. Kim, C.-Y. Ahn, O.-H. Kim, J.-G. Shim, D.W. Lee, J.H. Lee, Y.-H. Cho, Y.-E. Sung, Int J Hydrogen Energy 44 (2019) 22074–22084.
- [24] Kang DG, Lee DK, Choi JM, Shin DK, Kim MS, Renew Energy 156 (2020) 931-941.
- [25] Wu Y, Cho JIS, Whiteley M, Rasha L, Neville TP, Ziesche R, Xu R, Owen R, Kulkarni N, Hack J, Maier M, Kardjilov N, Markoetter H, Manke I, Wang FR, Shearing PR, Brett DJL, Int J Hydrogen Energy 45 (2020) 2195-2205.
- [26] Liu R, Zhou W, Li S, Li F, Ling W, Int J Hydrogen Energy 45 (2020) 17833-17843.
- [27] Antunes RA, Oliveira MCL, Ett G, Ett V, Int J Hydrogen Energy 35 (2010) 3632-3647.
- [28] Z. Xu, D. Qiu, P. Yi, L. Peng, X. Lai, Prog Nat Sci Mater Int 30 (2020) 815–824.
- [29] Lee Y-H, Li S-M, Tseng C-J, Su C-Y, Lin S-C, Jhuang J-W, Int J Hydrogen Energy 42 (2017) 22201-22207.
- [30] Y. Awin, N. Dukhan, Appl Energy 252 (2019) 113458.
- [31] F.-P. Ting, C.-W. Hsieh, W.-H. Weng, J.-C. Lin, Int J Hydrogen Energy 37 (2012) 13696–13703.
- [32] Tseng CJ, Heush YJ, Chiang CJ, Lee YH, Lee KR, Int J Hydrogen Energy 41 (2016) 16196–16204.
- [33] Ijaodola O, Ogungbemi E, Khatib FN, Wilberforce T, amadan M, El Hassan Z, Thompson J, Olabi AG, Energies 11 (2018) 3203.